УДК 692.66:006.354 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-38-50

Установление показателей загруженности и транспортной комфортности пассажирского лифта

А. С. Апрышкин, Г. Ш. Хазанович
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Лифты относятся к числу массовых подъемно-транспортных установок, которыми пользуются миллионы жителей многоэтажных домов. Безопасность и комфортность лифтовых установок определяются не только правильностью выбора их конструкции и параметров, но, прежде всего, организацией системы технического обслуживания. Каждый лифт является индивидуальной установкой, обслуживающей жилой дом с конкретным количеством пассажиров, определенной этажностью и другими особенностями. Нормативные документы рекомендуют стандартные схемы технического обслуживания лифтов. Возникает необходимость установить взаимосвязь режимов загрузки основных узлов и оптимальной схемы технических и ремонтных воздействий. Решению этой задачи наряду с исследованием транспортной комфортности посвящена настоящая работа.
Постановка задачи. Функционирование лифта в жилом доме с этажностью N происходит отдельными циклами. Этажи стояния, вызова кабины и назначения являются случайными величинами, для которых необходимо достоверно установить вероятностные характеристики. В общем случае режим работы лифта включает три этапа: вызов на уровень посадки пассажиров, движение с пассажирами на уровень назначения и ожидание очередного цикла. Внутри этапов движения возникают остановки.
Конкретная задача математического описания случайного процесса реализации режимных характеристик работы главного привода лифта сводится к двум направлениям:
1) разработка математических моделей формирования в течение цикла основных показателей загруженности главного привода лифта (чистого машинного времени τ_{mi} и числа включений n_{i});
2) исследование взаимосвязи пассажиропотока, плотности заселения дома и продолжительности цикла.
Теоретическая часть. Для решения перечисленных задач выполнены исследования следующих основных процессов, характеризующих функционирование лифта, уровень загруженности привода и транспортной комфортности: разработка математических моделей формирования показателей загруженности привода лифта, установление взаимосвязи пассажиропотока, плотности заселения жилого дома и продолжительности цикла, разработка методики расчета количества пролетов, проходимых лифтом в различных режимах, разработка способов расчета показателя «транспортная комфортность», обоснование структуры алгоритма моделирования режимов работы лифта.
Выводы. Получены результаты, которые дополняют теоретические положения по установлению загруженности и транспортной комфортности лифтов.

***Ключевые слова*:** пассажирский лифт, уровень загруженности, транспортная комфортность, режим работы, коэффициент машинного времени, удельное число включений, математические модели функционирования лифта, алгоритм имитационного моделирования.

***Для цитирования*:** Апрышкин, А. С. Установление показателей загруженности и транспортной комфортности пассажирского лифта / А. С. Апрышкин, Г. Ш. Хазанович // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 1. — С. 38−50. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-38-50

Determination of capacity and comfort indicators of a passenger elevator

A. S. Apryshkin, G. S. Khazanovich
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. Elevators are mass weight-handling units used by millions of residents of multi-storey buildings. Safety of elevator units and comfort of their use are determined not only by the correct choice of their design and parameters, but first of all, by the organization of the maintenance system. Each elevator is an individual unit that serves a residential building with a specific number of passengers, number of floors and other features. However, regulatory documents recommend standard maintenance plans. There is the need to establish the relationship between the loading modes of the main components and the optimal scheme of technical and repair works. The present work is devoted to the solution of this problem, along with the study of transport comfort.

Problem Statement. The operation of the elevator in a residential building with a number of floors N occurs in separate cycles. Standing, lift call, and destination floors are random variables for which probabilistic characteristics must be reliably established. In general, the elevator operation mode includes three stages: calling to the passenger boarding level, moving with passengers to the destination level, and waiting for the next cycle. There are stops inside the movement stages.
The specific problem of mathematical description of the random process of implementing the operating characteristics of the main drive of the elevator is reduced to two directions: 1) the development of mathematical models for the formation of the main indicators of the main elevator drive load during the cycle (net machine time τ_{mi} and the number of switches n)$_i$; 2) the study of the relationship between passenger traffic, building residential density and cycle duration.
Theoretical Part. To meet these objectives the authors have performed the studies of the following main processes characterizing the functioning of the lift, the level of capacity of the transport drive and comfort: the development of mathematical models of formation of indicators of the elevator drive load; the establishment of the relationship of traffic flow, residential density and the duration of the cycle; development of methodology for calculation of the number of flights went by the elevator in different modes; development of methods of calculating the transport comfort indicator; justification of the structure of the algorithm for modeling the operating modes of the elevator.
Conclusion. The paper provides the results, which complement the theoretical provisions for determining the capacity and transport comfort of elevators.

Keywords: passenger elevator; load level; transport comfort; operating mode; machine time coefficient; specific number of switches; mathematical models of elevator operation; simulation algorithm**.**

***For citation*:** Apryshkin A. S., Khazanovich G. S. Determination of capacity and comfort indicators of a passenger elevator: Safety of Technogenic and Natural Systems. 2021;1:38−50. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-38-50

Введение. В соответствии с определением, сформулированным в нормативном стандарте, «лифт — грузоподъемная машина периодического действия, предназначенная для подъема и спуска людей и (или) грузов в кабине, движущейся по жестким прямолинейным направляющим, у которых угол наклона к вертикали не более 15°» [1]. Этими устройствами оборудовано большинство многоэтажных домов во всем мире. К настоящему времени в России эксплуатируется около 500 тысяч лифтовых установок. Масштаб проектирования, изготовления и применения лифтов будет возрастать в связи с ростом объемов многоэтажного строительства жилых и общественных зданий.

Требования, предъявляемые к лифтовым установкам, определены основным документом — Техническим регламентом Таможенного союза [2]. Среди них важнейшими являются требования безопасности и комфортности пассажиров. Очевидно, что каждое из этих требований может быть представлено в виде многофакторных зависимостей, которые должны учитываться при проектировании, изготовлении и эксплуатации лифтовых установок.

Безопасность при эксплуатации лифтовой установки в основном зависит от двух групп факторов:

— уровень загруженности несущих элементов и его соответствие нормативным значениям;

— обеспечение необходимого качества технического обслуживания.

Очевидно, что объем и содержание процедур технического обслуживания должны быть связаны с показателями фактических нагрузок, действующих на силовые элементы установки, прежде всего главный привод, включая канатно-тяговый механизм, привод дверей и ряд других.

Нагрузки подсистемы главного привода — двигателя, трансмиссии, канатно-тягового механизма — формируются в соответствии с режимом работы. Для циклического режима работы лифтовой установки важно выделить два основных кинематических показателя: относительное время работы привода и число включений (торможений) в единицу времени. Каждый из этих показателей косвенно характеризует действующие крутящие моменты и усилия в ответственных узлах Установление этих показателей не исключает необходимости определения реальных нагрузок. Этим вопросам посвящена работа Khazanovich G. S., Otrokov A. V., Aprishrin D. S. Computer Modeling of Dynamic Processes of Passenger Elevators at Casual External Influence (Компьютерное моделирование динамических процессов пассажирских лифтов при случайных внешних воздействиях) [3]. Вместе с тем знание режимных кинематических показателей позволит предварительно, без сложных расчетов оценивать степень силовой загруженности лифтовой установки.

Показатель «транспортная комфортность» определен ГОСТ Р 52941–2008 (ИСО 4190–6:1984). Национальный стандарт Российской Федерации. Лифты пассажирские [1]. Он представляет собой интервал движения лифтов, выраженный в виде периода времени между двумя последовательными отправлениями кабин

лифтов в заданном направлении на основном посадочном этаже. При этом основной посадочный этаж — это этаж, на котором входящие в здание люди имеют доступ к лифтам.

Авторы подчеркивают, что показатель транспортной комфортности представляет собой случайную величину — это промежуток времени между двумя последовательными циклами при движении лифта вверх с первого этажа до этажа назначения. Показатель комфортности, естественно, в реальных условиях изменяется от минимального до максимального значения. Наиболее представительным значением показателя комфортности может являться средняя величина в различные периоды суточной эксплуатации: утренней, дневной, вечерней и ночной.

В состав цикла входят следующие элементы: вызов и движение лифта с этажа ожидания до первого этажа, посадка случайного числа пассажиров на первом этаже, движение вверх до этажа назначения со случайными остановками. Для вычисления средних показателей загруженности и транспортной комфортности лифта необходимы следующие исходные данные:

— этажность дома — N;

— расстояние между этажами — h, м;

— средняя скорость движения лифтовой кабины — v, м/с;

— грузоподъемность лифта как максимальное число пассажиров — R;

— статистический ряд распределения числа пассажиров — r, входящих в лифт для очередного i-го рейса;

— ряд распределения номера этажа стояния лифта — L при вызове его с первого этажа или промежуточных этажей;

— ряд распределения числа промежуточных остановок — $R_п$ при движении лифта с первого этажа на конечный этаж назначения — S;

— ряд распределения числа остановок лифта при движении вверх с пассажирами — n;

— функция распределения продолжительности цикла — τ или длительности ожидания очередного цикла — Δ.

Обоснование перечня других исходных данных приведено в процессе изложения материала статьи.

Очевидно, что показатель транспортной комфортности, как и характеристики загруженности лифта, могут быть получены только на основе имитационного моделирования режима работы установки как случайного процесса. Эти задачи могут и должны решаться совместно на основе единых математических моделей формирования кинематических характеристик лифтовой установки.

Актуальность темы исследования. Актуальность данного исследования вытекает из необходимости оценивать уровень загруженности основных силовых узлов лифтовой установки и транспортную комфортность предварительно, на стадии проектирования лифта или выбора типоразмера из числа предлагаемых вариантов. Это позволит заранее определить тип и характеристики двигателя, скорость движения кабины и другие показатели.

Целью работы является разработка математического аппарата для обеспечения процесса имитационного моделирования кинематических режимов работы пассажирских лифтов, позволяющего установить показатели загруженности и транспортной комфортности пассажирских лифтовых установок.

Постановка задачи. Функционирование лифта в жилом доме с этажностью N происходит отдельными циклами. Номер произвольного цикла обозначим через i, $1 \leq i \leq I$, где I — общее количество циклов за некоторый период наблюдения. Каждый цикл состоит из трех периодов:

1) вызов, в котором происходит движения лифта без пассажиров с уровня стояния после предыдущего цикла на этаже L на уровень ожидания пассажирами на этаже M;

2) движение лифта с пассажирами с уровня M на этаж назначения S;

3) пауза длительностью Δ, с (рис. 1).

Рис. 1. Кинематическая структура циклов: А — вызов и движение на первый этаж без промежуточных остановок; Б — вызов и движение с первого этажа на произвольный этаж S с промежуточными остановками; А+Б — вызов с произвольного этажа L на произвольный этаж M и движение на первый этаж без промежуточных остановок (по вертикали — номера этажей, по горизонтали — условное время в минутах)

Величины L, M и S являются случайными целочисленными переменными, принимающими значения в диапазонах:

— при предполагаемом движении лифта вниз на первый этаж (цикл А) — $1 \le L \le N$; $2 \le M \le N$; $S=1$;

— при предполагаемом движении лифта вверх с первого этажа (цикл Б) $M=1$ на этаж назначения S, $2 \le L \le N$; $2 \le S \le N$.

Внутри каждого из периодов 1 и 2 имеют место промежуточные $R_{пi}$ и конечные R_{ki} остановки, на каждой из которых происходит включение (торможение) главного привода, число которых в каждом цикле равно n_i, а также открывание-закрывание дверей с входом-выходом пассажиров.

После завершения периодов 1 и 2 наступает случайное время паузы Δ_i до начала очередного цикла. Величина Δ_i является непрерывной случайной величиной, зависящей прежде всего от фактического пассажиропотока. Общая продолжительность произвольного цикла обозначена τ_i, продолжительность работы привода, измеренная чистым машинным временем в минутах (ЧМВ), — τ_{mi}.

Таким образом, конкретная задача математического описания случайного процесса реализации режимных характеристик работы главного привода лифта сводится к двум направлениям:

1) разработка математических моделей формирования в течение цикла основных показателей загруженности главного привода лифта: чистого машинного времени τ_{mi} и числа включений n_i, в том числе:

— при движении лифта вниз (цикл типа А);

— при движении лифта вверх (цикл типа Б);

— при стохастическом чередовании направлений движения (цикл типа А+Б);

2) исследование взаимосвязи пассажиропотока, плотности заселения жилого дома и продолжительности цикла.

Теоретическая часть. Математические модели формирования показателей загруженности привода лифта. Обозначим случайное расстояние, проходимое кабиной лифта в i-м цикле, $K_{прi}$. Если межэтажное расстояние (в метрах) h=const, а средняя скорость с учетом разгонов и торможений — v м/с, то среднее чистое машинное время (ЧМВ) за цикл в интервале $1 \le i \le I$ составит:

$$\tau_{mср} = \frac{h}{60v} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{I} K_{прi}}{I}, \tag{1}$$

а среднее число включений главного привода за минуту ЧМВ:

$$n_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{I} n_i}{I} \cdot \frac{1}{\tau_{mср}} = \frac{\sum_{i=1}^{I} n_i}{\sum_{i=1}^{I} K_{прi}} \cdot \frac{60v}{h} \tag{2}$$

Приведенные соотношения позволяют сделать предварительные заключения:

— среднее значение чистого машинного времени цикла $\tau_{mср}$ зависит пропорционально от накопленного количества пройденных кабиной пролетов $\sum_{i=1}^{I} K_{прi}$ и обратно пропорционально средней скорости движения кабины;

— среднее удельное число включений $n_{ср}$ пропорционально средней за цикл скорости лифта v, с увеличением скорости v среднее число включений за минуту ЧМВ пропорционально увеличивается.

Проанализировав формулы, приходим к выводу, что для разработки адекватных статистических моделей кинематических характеристик режимов работы привода лифта необходимо детализовать порядок

перемещений лифта при различных направлениях движения и определить статистические подходы к расчету суммарных или средних значений числа включений и количества пройденных кабиной пролетов. Для этого, как показано ранее, выделены три случая: движение лифта вниз с произвольного этажа на первый этаж без промежуточных остановок (цикл А), движение лифта вверх со случайным числом промежуточных остановок (цикл Б), а также комбинированный вариант при различном сочетании циклов А и Б.

Рассмотрим в качестве начального цикл А, характерный для утреннего времени: движение пассажиров производится с произвольного этажа M вниз до первого этажа S=1 без промежуточных остановок.

Каждый цикл начинается со стояния лифта на первом этаже, L=1. Этаж вызова при этом произвольный в диапазоне от M=2 до M=N. При этом цикл работы лифта происходит в два этапа:

1) движение лифта по вызову с этажа L=1 до произвольного этажа 2≤M≤N. Так как случайная величина M распределена априори по закону равномерной плотности, то среднее количество пролетов, которые проходит лифт в первом этапе, равно $К_{пр1}$=1/2·(N+2);

2) движение лифта с этажа M на первый этаж; очевидно, что по аналогии с этапом 1 среднее количество пролетов, проходимых лифтом при спуске, определяется по такому же выражению — $К_{пр2}$=1/2·(N+2).

Тогда общее среднее количество пролетов за цикл равно

$$К_{пр}= К_{пр1}+ К_{пр2}=N+2. \quad (3)$$

Воспользовавшись формулой (2) для расчета $n_{ср}$, получим в числителе суммарное число включений за I циклов. Очевидно, что в каждом рассмотренном цикле ровно два включения: первое — в начале движения лифта с этажа стояния L=1 на этаж вызова M, второе — в начале движения с этажа вызова M на первый этаж. Тогда общее число включений за I циклов составит

$$\sum_{i=1}^{I} n_i=2\cdot I.$$

Общее число пролетов, проходимых лифтом за I циклов, равно сумме случайных значений от $K_{пр.i} = 1$ до $K_{пр.i}$=N-1, причем вероятности этих значений одинаковы и равны P_i=1/I. Среднее значение количества пройденных лифтом пролетов, как показано выше, равно $К_{пр}$=N+2, а общее число пролетов $\sum_{i=1}^{I} K_{пр.i}$=I(N+2). Тогда

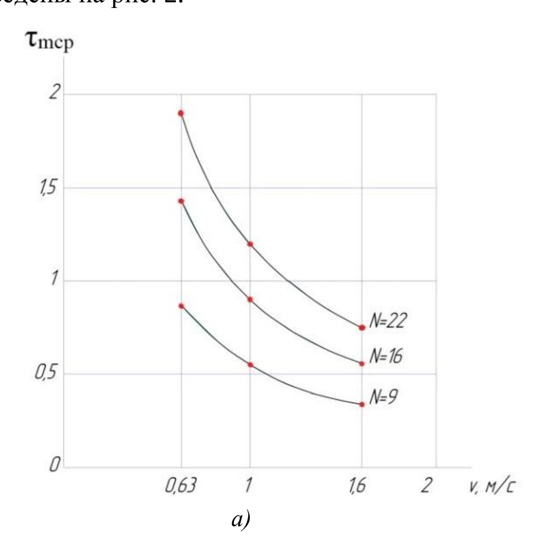
$$n_{ср}=\frac{2I}{I(N+2)}\cdot\frac{60v}{h}=\frac{120v}{(N+2)\cdot h}. \quad (4)$$

Как видно на формуле (4), среднее число включений главного привода в минуту чистого времени его работы в утреннем режиме пропорционально скорости кабины и обратно пропорционально этажности дома.

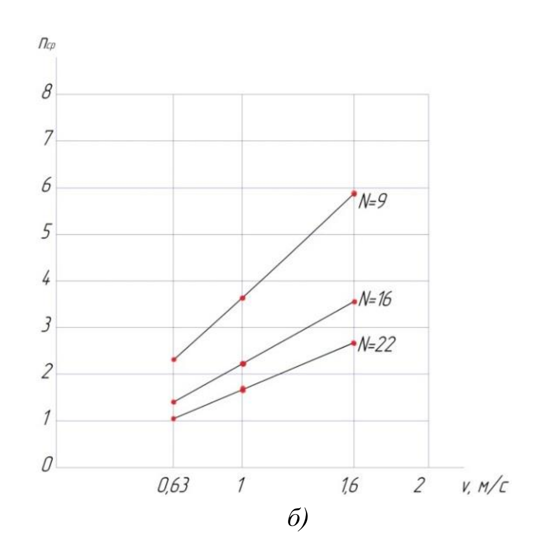
Среднее ЧМВ за период одного случайного цикла составит

$$\tau_{mср}=\frac{h(N+2)}{60v}. \quad (5)$$

Графики изменения $\tau_{mср}$ (мин. ЧМВ) и $n_{ср}$ (1/мин. ЧМВ) в функции скорости v и этажности дома N приведены на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости для циклов вида А — $\tau_{mср}$ (мин. ЧМВ) (а) и удельного числа включений $n_{ср}$ (1/мин. ЧМВ) (б) от скорости кабины v и этажности дома N

Рассмотрим особенности математических моделей для цикла Б (рис. 1). Цикл состоит из операции вызова лифта на произвольный этаж M с первого этажа и движения с пассажирами на отрезке M, S=1.

Очевидно, что среднее количество пролетов определяется аналогично циклу (А), справедливы формулы (4) и (5).

Расчет количества пролетов, проходимых лифтом в так называемом смешанном режиме А+Б. Смешанным режимом в жилом доме этажностью N условно назван случай движения лифта вниз на первый этаж (S=1) с этажа вызова M при условии, что до вызова лифт находился на этаже стояния (ожидания) L (рис. 1). При этом возможны случаи L>M и L<M. Необходимо найти математическое выражение для расчета среднего количества пролетов, проходимых лифтом при движении с этажа L на этаж M. Обозначим это значение $K_{пр.А+Б}$. Очевидно, что число пролетов в i-м цикле равно $K_{пр.(А+Б)i}=|M_i–L_i|$. Нужно заметить, что для вычисления среднего значения случайной величины $K_{пр.(А+Б)}$ необходимо рассматривать числа M и L как систему случайных величин. Каждой величине M, которая может принимать целочисленные значения 2≤M≤N, соответствует ряд значений величины L из диапазона 1≤L≤N. Так как случайная величина M может принимать число значений N–1, а L — число значений N, то общее число сочетаний (M, L) составит W_N=N(N–1). Например, для домов с этажностью N=9 — W_N=72, для N=16 — W_N=240, для N=22 — W_N=462.

Отметим, что при фиксированном значении M_i цепочка $|M_i–L_i|$состоит из двух участков. Первый участок — убывающий ряд натуральных чисел: M-1; M-2;…; M=L. Второй участок — возрастающий ряд натуральных чисел: M–(L+1); M-(L+2);…; M-N. Например, при N=7 и M=3 результаты соответствуют данным, приведенным в таблице 1.

Таблица 1

Изменение количества пролетов |M–L| от уровня стояния L для M=3 (пример)

M	3	3	3	3	3	3	3
L	1	2	3	4	5	6	7
$\|M_i–L_i\|$	2	1	0	1	2	3	4
Ряды	Убывающий			Возрастающий			

Как видим, оба ряда представляют собой арифметические прогрессии с одинаковым знаменателем, равным единице. Сумма членов арифметической прогрессии, как известно, определяется по формуле $S_n=n(a_1+a_n)/2$, где n — число членов, a_1,a_n — значения первого и последнего членов прогрессии [4]. Тогда суммы членов для убывающего ряда Σ_I=M(M-1)/2, для возрастающего ряда Σ_{II}=(N-M)[1+(N-M)]/2=[(N-M)+(N-M)^2]/2.

Для примера при N=7 и M=3: Σ_I=M·(M-1)/2=3·2/2=3; Σ_{II}= [(N-M)+(N-M)^2]/2 = [(7-3)+(7-3)^2]/2=10, что соответствует данным таблицы.

Таким образом, сумма членов двух участков при конкретном фиксированном значении M определится по формуле:

$$К_{пр1ц} = \Sigma_I + \Sigma_{II} = \frac{1}{2}[M(M-1) + (N-M) + (N-M)^2]$$

После простых преобразований получаем:

$$К_{пр1ц} = M^2 + \frac{N(N+1)}{2} - (N+1)\cdot M. \quad (6)$$

Всего количество таких цепочек при изменении M от 2 до N составит N-1 штук. Тогда суммарное число вариантов пролетов, которые могут быть реализованы в каждом конкретном цикле, определится суммированием при изменении M от 2 до N:

$$К_{пр\Sigma} = \sum_{M=2}^{N} M^2 - \sum_{M=2}^{N} M - \sum_{M=2}^{N} M\cdot N + \sum_{M=2}^{N}\frac{1}{2}(N^2+N).$$

При вычислении частных сумм используем для первого члена формулу Ферма [4]:

$$\sum_{M=2}^{N} M^2 = \frac{N(N+1)(2N+1)}{6} - 1. \quad (7)$$

Формула (7) представлена для случая, когда сумма квадратов начинается от M=2.

Суммы, в которые M входит в первой степени, представляют собой арифметические прогрессии, способ вычисления которых показан выше.

Последнее слагаемое вычисляется по формуле:

$$\sum_{M=2}^{N}\frac{1}{2}(N^2+N) = \frac{N(N+1)}{2}\cdot(N-1),$$

где сомножитель (N–1) указывает на число операций сложения при изменении M от 2 до N. В результате сумма приобретает вид:

$$К_{пр\Sigma} = \frac{N}{2}(N^2-1) + \frac{N(N+1)(2N+1)}{6} - 1 + (N^2-1)\frac{2+N}{2}.$$

Приводя подобные члены, получим формулу для расчета возможного суммарного количества вариантов пролетов, проходимых лифтом в цикле (А+Б):

$$К_{пр\Sigma} = \frac{1}{6}N(N+1)(2N+1) - N^2. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой разновидность формулы Ферма для рассматриваемого случая суммирования числа пролетов [5]. Для выполнения расчетов выражение (8) можно также записать в виде:

$$К_{пр\Sigma}=\sum_{M=1}^{N-1} M^2. \quad (9)$$

Среднее количество пролетов, проходимых кабиной лифта за один цикл в период движения с этажа стояния L на этаж вызова M:

$$К_{пр(L-M)} = \frac{К_{пр\Sigma}}{W_N} = \frac{N(N+1)(2N+1)}{6N(N-1)} - \frac{N^2}{N(N-1)} = \frac{(N+1)(2N+1)-6N}{6(N-1)} \quad (10)$$

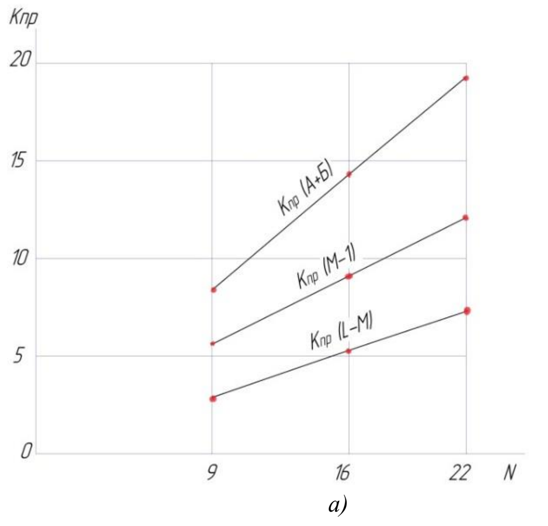
При движении лифта с этажа вызова M на первый этаж среднее число пролетов, как показано ранее, составит $К_{пр(M-1)}=1/2\cdot(N+2)$. Тогда общее выражение для расчета среднего числа пролетов, проходимых лифтом в цикле вида (А+Б), примет вид:

$$К_{пр(А+Б)ср} = \frac{(N+1)(2N+1)-6N}{6(N-1)} + \frac{N+2}{2}. \quad (11)$$

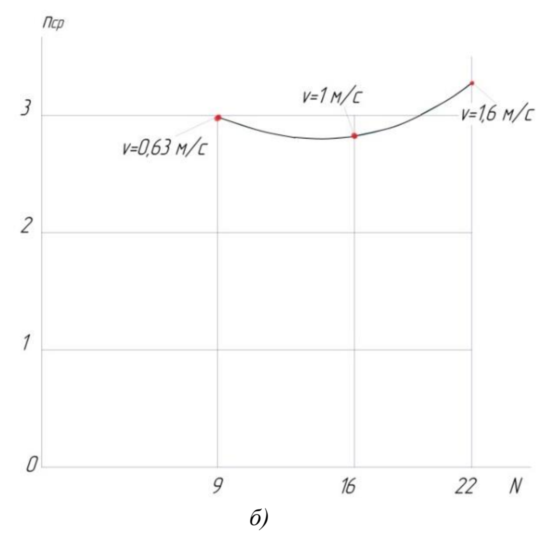
Формулы (3), (10) и (11) являются универсальными соотношениями для вычисления среднего числа пролетов, проходимых лифтом в циклах различного вида. Построенные графики дают представление о зависимостях составляющих $К_{пр}$ в функции числа этажей N (рис. 3).

По известному значению $К_{пр(А+Б)ср}$ можно по формулам (1), (5) определить чистое машинное время цикла $\tau_{mср}$ и удельное число включений $n_{ср}$, для этого необходимы индивидуальные показатели лифта и жилого дома — средняя скорость движения v и межэтажная высота h.

Математические соотношения (3), (4) и (11) позволяют получить составляющую среднего значения продолжительности цикла в отдельных периодах работы лифта, необходимую для имитационного моделирования



а)



б)

Рис. 3. Зависимости среднего количества пролетов, проходимых лифтом, и удельного числа включений в циклах вида А+Б от этажности дома и скорости кабины: а — число пролетов по составляющим при вызове (L–M), движении (M–1) и суммарные; б — число включений в минуту у ЧМВ при скоростях кабины, соответствующих этажности дома

Взаимосвязь пассажиропотока, плотности заселения жилого дома и продолжительности цикла. Продолжительность цикла работы лифта τ_i является одним из важнейших показателей, определяющих загруженность и транспортную комфортность установки.

Составляющие величины τ_i приведены выше. Очевидно, что главным фактором, определяющим среднюю продолжительность цикла $\tau_{ср}$, является пассажиропоток (ППТ) $А_л$. Этот показатель относится к числу нормативных величин, задаваемых соответствующим стандартом [1]. Исходный средний пассажиропоток согласно [1] определяется по формуле:

$$A_{1p} = 12 \cdot A_{п.л} \cdot \frac{(N-N_н)\cdot Y}{100N}, \quad (12)$$

где $A_{п.л}$ — число пассажиров дома или подъезда, пользующихся лифтом,

$$A_{п.л} = (N - N_н) \cdot C_{кв} \cdot d_{кв}, \quad (13)$$

N — число заселенных этажей; $N_н$ — число этажей, жильцы которых не пользуются лифтом (обычно $N_н$=1); Y — показатель интенсивности ППТ, характеризующий число людей, подлежащих перевозке в течение пятиминутного интервала, в процентах от числа людей, пользующихся лифтами (i=4–8%); $C_{кв}$ — среднее число

квартир на одном этаже; $d_{кв}$ — число человек одной квартиры, пользующихся лифтом; согласно [1] этот показатель рекомендуется принимать в диапазоне 1, 2–3.

Анализ показывает, что применение показателя $d_{кв}$ ко всем лифтам приводит к некорректным результатам: среднее число жильцов в отдельной квартире $d \le d_{кв}$.

Логично предположить, что количество жильцов, пользующихся лифтом, пропорционально общему числу жителей подъезда или дома. В этом случае расчет не будет связан с величиной $d_{кв}$ — средним числом жильцов отдельной квартиры, пользующихся лифтом. Более обоснованно в выражение (13) вводить единый условный показатель, зависящий только от числа жителей данного дома или подъезда. Каждый дом или подъезд должен характеризоваться индивидуальными показателями: числом строительных этажей N, общим (списочным) числом жителей Z и единым показателем — долей числа жителей, пользующихся лифтом $d_{жд}$. Тогда число пассажиров дома или подъезда, пользующихся лифтом $A_{п.л}$, можно определить по формуле:

$$A_{п.л} = Z \cdot \frac{M_k - M_{1k}}{M_k} \cdot d_{жд}, \quad (14)$$

где M_k — общее число квартир в доме (подъезде); M_{1k} — число квартир в доме (подъезде), жильцы которых не пользуются лифтом.

Тогда, с учетом рекомендаций [1] и предложенных изменений, расчетный часовой пассажиропоток можно определять по формуле:

$$A_{1p} = 0{,}12 \cdot Z \cdot \frac{M_k - M_{1k}}{M_k} \cdot d_{жд} \cdot \frac{(N - N_н) \cdot Y}{N}. \quad (15)$$

Расчетный средний минутный ППТ составит:

$$A_{1p} = 0{,}002 \cdot Z \cdot \frac{M_k - M_{1k}}{M_k} \cdot d_{жд} \cdot \frac{(N - N_н) \cdot Y}{N}. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет получить формулу для расчета средней продолжительности цикла. Для этого введем средний показатель заполнения кабины в цикле $r_{ср}$. Величина r является случайной, ряд распределения которой установлен опытным путем. Данные о ряде распределения приведены в [5], для большинства случаев при R=5 чел. $r_{ср}$=2,25, при R=8 $r_{ср}$=2,85.

Расчетная средняя продолжительность цикла $\tau_{ср}$ (мин/цикл) определяется как частное от деления среднего показателя заполнения кабины в цикле $r_{ср}$ на средний минутный грузопоток A_{1p}, т. е.

$$\tau_{ср} = r_{ср}/A_{1p}. \quad (17)$$

После простых преобразований получаем:

$$\tau_{ср} = \frac{500 \cdot M_k \cdot N \cdot r_{ср}}{Z \cdot (M_k - M_{1k}) \cdot d_{жд} (N - N_н) \cdot Y}. \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет произвести качественную оценку влияния основных факторов на продолжительность цикла, обеспечивающего заданный пассажиропоток. Если принять, что отношения $N/(N-N_н)$ и $M_k/(M_k-M_{1k})$ близки к единице, то основными влияющими факторами являются уровень заполнения кабины пассажирами $r_{ср}$ (пропорциональная зависимость) и условное проектное число пассажиров, пользующихся лифтом, $Z \cdot d_{жд} \cdot Y$ (обратно пропорциональная зависимость).

Совокупность математических моделей (4), (5), (11) и (18) позволяет вычислять средние значения основных кинематических характеристик режима эксплуатации лифта, а также получать все необходимые исходные данные для запуска процесса имитационного моделирования. Рассмотрим порядок вычисления средних значений коэффициента машинного времени $K_{mср}$, удельного числа включений главного привода в минуту ЧМВ $n_{ср}$ и продолжительности паузы пред очередным циклом $\Delta_{ср}$.

Как известно, $K_{mср}$ — это отношение ЧМВ лифта за цикл $\tau_{mср}$ к общему среднему значению продолжительности цикла $\tau_{ср}$ — формула (18). Вычисление $\tau_{mср}$ представляет собой отдельную задачу анализа общего режима работы лифта за длительный промежуток времени. Как показано выше, выделено три основных цикла — А, Б и А+Б, в каждом из которых среднее значение ЧМВ определяется индивидуальными соотношениями: для циклов А и Б — это формула (5), для цикла А+Б — формулы (1) и (11). Для вычисления среднего значения $\tau_{mср}$ необходимо дополнительно задаться соотношениями долевого участия каждого из циклов в общей структуре режима. Обозначим $\gamma_А$, $\gamma_Б$ и $\gamma_{(А+Б)}$ соответственно долевые части циклов различного вида, при этом $\gamma_А+\gamma_Б+\gamma_{(А+Б)}=1$. Циклы вида А — в основном перемещения лифта на первый этаж, утренний режим, вида Б — вечерний режим, вида А+Б — дневной и ночной режимы. Среднюю продолжительность ЧМВ при разной скорости для всех лифтов (независимо от этажности дома) можно определить по формуле:

$$\tau_{mср} = \frac{h}{60 v(N)} \left[(\gamma_А + \gamma_Б) \cdot (N + 2) + \gamma_{(А+Б)} \cdot K_{пр(А+Б)ср} \right], \quad (19)$$

где $K_{пр(А+Б)ср}$ — вычисляется по формуле (11); $v(N)$ — зависимость принятой скорости лифта от этажности дома.

Выражение (19) свидетельствует о том, что при известном режиме чередования циклов величина среднего ЧМВ зависит прежде всего от этажности дома и скорости движения кабины лифта. Для примера на рис. 4, (график а) дана зависимость τ_{mcp}=f(N) при $(\gamma_A + \gamma_Б) = 0{,}8$, v=1 м/с; на графике б — изменение ЧМВ при скоростях кабины, соответствующих этажности дома, показанных на рис. 3 б.

Математическая модель случайной величины — длительности ожидания очередного цикла. Приведенные данные могут быть использованы при обосновании начальных параметров для процесса имитационного моделирования. Для полномасштабной реализации поциклового имитационного процесса необходимы знания функций или плотности распределения случайных переменных, перечень которых представлен в вводной части статьи. Ряды распределения дискретных величин M, L, S и абсолютного значения разности |M-L| рассмотрены выше. Методика расчета и моделирования случайного числа остановок лифта при движении с пассажирами вверх с первого этажа приведена в работе Д. С. Апрышкина и Г. Ш. Хазановича «Методика и алгоритм имитационного моделирования режимов работы пассажирского лифта» [5]. Рассмотрим определение случайного времени ожидания очередного цикла Δ.

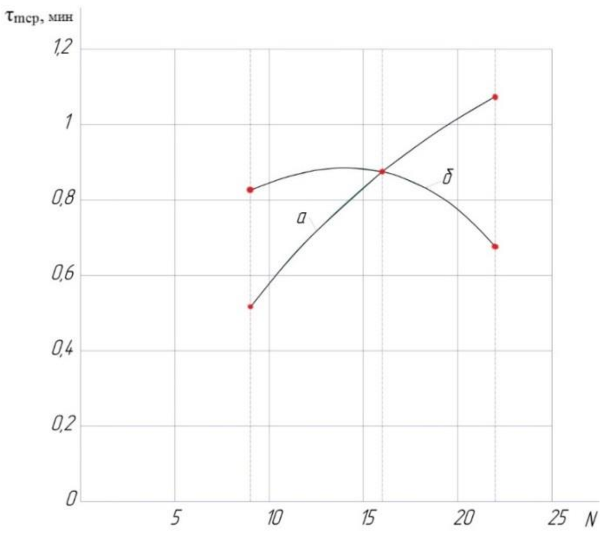


Рис. 4. Влияние этажности жилого дома (N) на средние значения ЧМВ цикла

Соотношение между временными элементами цикла дает соотношение

$$\tau=(\Delta+ \tau_m+ \tau_{пз}), \tag{20}$$

где $\tau_{пз}$ — совокупное время, затрачиваемое на посадку-высадку пассажиров.

Переходя к средним значениям, получим

$$\Delta_{ср}=\tau_{ср}-\tau_{mcp}-\tau_{пзср}. \tag{21}$$

Средние значения составляющих $\tau_{ср}$ и τ_{mcp} вычисляются по формулам соответственно (18) и (19). Суммарное время $\tau_{пзср}$ зависит от количества остановок $F_{пв}$ и средней продолжительности одной остановки $t_{1.пв}$

$$\tau_{пз}= F_{пв}\cdot t_{1.пв}. \tag{22}$$

Количество остановок в цикле складывается из конечных $F_{пвк}$ и промежуточных $F_{пвп}$ и зависит от вида движения — А, Б или А+Б. При движении лифта вниз промежуточные остановки не предусмотрены, количество конечных остановок для циклов любого вида равно двум, т. е. $F_{пвк}=2$. Число промежуточных остановок при движении лифта вверх определяется по методике, изложенной в [5].

Случайная величина Δ, как элемент системы массового обслуживания, моделируется по экспоненциальному закону с параметром $\Delta_{ср}$ [6– 7]. Плотность вероятности имеет вид:

$$f(\Delta) = \frac{1}{\Delta_{ср}} e^{-\frac{\Delta}{\Delta_{ср}}}. \tag{23}$$

Пропускная способность лифтовой установки. Обоснованные выше математические модели процессов функционирования лифта позволяют решить задачу определения максимальной пропускной способности установки, $Q_{пр}$, чел/час. Основой является продолжительность ЧМВ комбинированного цикла (А, Б, А+Б) в сумме с продолжительностью остановок для посадки-высадки пассажиров, а также среднее число пассажиров, перевозимых за цикл, т. е.

$$Q_{пр} = \frac{60\cdot d_{ср}}{\tau_{mср}+\tau_{пзср}+\delta}, \tag{24}$$

где δ — допустимое время ожидания очередного цикла, не более одной минуты; $\tau_{mср}$ вычисляется по формуле (19); $\tau_{пзср}$ — по формуле (22).

Выражение (24) позволяет на стадии проектирования и выбора лифтовой установки проанализировать влияние важнейших факторов на ее среднюю пропускную способность — этажность дома, скорость и вместимость кабины. Полученные значения $Q_{пр}$ необходимо сравнить с расчетным часовым пассажиропотоком $A_{1р}$(16) и определить коэффициент запаса ППП.

Расчет показателя «транспортная комфортность лифтовой установки». В первую очередь необходимо установить средний возможный интервал движения кабины с первого этажа здания [1]. В соответствии с введенными обозначениями необходимо вычислить средний интервал цикла вида Б при известной частоте следования этих циклов $\gamma_Б$. Если среднее значение ЧМВ цикла вида Б определить в соответствии с (5) и учесть потери времени на открывание-закрывание дверей согласно (22), то среднее время, через которое лифт будет находиться в положении перед подъемом с первого этажа, составит:

$$\tau_{ТК} = \frac{1}{\gamma_Б}\left[\frac{h(N+2)}{60v(N)} + F_{ПВ.Б} \cdot t_{1.ПВ}\right] + \delta_1, \tag{25}$$

где $\tau_{ТК}$ — средний показатель транспортной комфортности лифта, мин.; $F_{ПВ.Б}$ — среднее количество остановок при движении лифта в цикле Б с первого этажа; δ_1 — условный интервал ожидания очередного цикла (10 сек.).

Для оценки текущего уровня транспортной комфортности в процессе моделирования в числителе формулы (25) вместо (N+2) вставляется фактическое число пролетов, прошедших лифтом в циклах Б с первого этажа, $\Delta_Б$:

$$\tau_{ТКБ} = \frac{1}{\gamma_Б}\left[\frac{h \cdot \Delta_Б}{60v(N)} + F_{ПВ.Б} \cdot t_{1.ПВ}\right] + \delta_1. \tag{26}$$

Как видно по выражению (25), расчетный средний показатель $\tau_{ТК}$ зависит от этажности дома, средней скорости движения кабины, числа остановок с посадкой-высадкой пассажиров и удельного количества циклов вида Б в общем числе циклов. Результат расчета по формуле (25) характеризует транспортную комфортность лифтовой установки за весь суточный период ее эксплуатации. Для оценки транспортной комфортности в часы наибольшей загрузки лифта циклами вида Б (так называемый вечерний режим) доля этого режима существенно повышается (таблица 2).

Для оценки уровня транспортной комфортности введены граничные значения: до 60 с. — отличный, 60–80 с. — хороший, 80–100 с. — удовлетворительный. Как видно на таблице, по средним значениям показатель уровня транспортной комфортности оценивать нецелесообразно, т. к. расчетные показатели значительно ниже установленных стандартом. Для вечернего режима показатели $\tau_{ТК.веч.}$близки к хорошим или удовлетворительным значениям. Основным средством повышения уровня транспортной комфортности лифта является увеличение средней скорости.

Таблица 2

Расчет значений показателя транспортной комфортности типовых лифтов

N	v,м/с	$F_{ПВ.Б}$	$t_{1.ПВ}$,с	$\gamma_{Б.ср}$ / $\gamma_{Б.веч}$	δ_1, с	$\tau_{ТК.ср}$,с	$\tau_{ТК.веч.}$, с
9	0,63	2	8	0,4	10	180,5	80,2
				0,9			
16	1,0	2	8	0,4	10	185,5	82,4
				0,9			
22	1,6	2	8	0,4	10	163,4	72,6
				0,9			

При расчете и анализе основных показателей лифтовых установок учитывались требования нормативных документов [1–2, 8–10].

Структура алгоритма моделирования режимов работы лифта в целях оценки уровня загруженности и транспортной комфортности. Описание полного алгоритма моделирования режимов работы лифта представляет собой громоздкую задачу. В связи с этим ниже приведена структура алгоритма и краткие пояснения к ней (рис. 5).

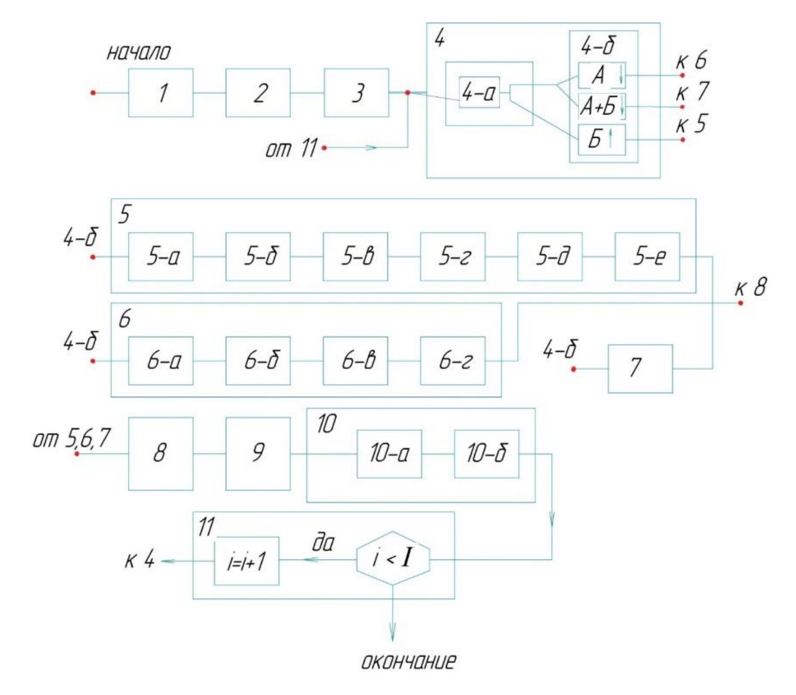


Рис. 5. Структура алгоритма имитационного моделирования режимов работы и показателя транспортной комфортности лифтовой установки

Процедура имитационного моделирования состоит из следующих основных блоков:

1 — ввод исходных данных, которые разделены на группы: характеристики жилого дома, лифтовой установки и общие характеристики режима — N, $N_н$, h, Z, $d_{жд}$, M_k, M_{k1}; v, R; Y, $ɣ_A$, $ɣ_Б$, $ɣ_{A+Б}$, $d_{ср}$, $F_{ПВ}$, $t_{1ПВ}$, δ, I;

2 — расчет средних исходных показателей, необходимых для моделирования продолжительности паузы между циклами $\Delta_{ср}$ (21), показателя транспортной комфортности $\tau_{ТК}$ (25) и пропускной способности лифтовой установки $Q_{пр}$ (24): $K_{пр(A+Б)ср}$ (11), $\tau_{ср}$ (18), $\tau_{mср}$ (19), $\tau_{пзср}$ (22), $n_{ср}$ (2), $A_{1р}$ (15);

3 — ввод начальных условий: номер цикла i, этаж стояния лифта L_i;

4 — определение случайного вида цикла в соответствии с направлением движения (4-а), распределением $ɣ_A$, $ɣ_Б$, $ɣ_{A+Б}$: А, Б или А+Б (шаг 4-б);

5 — при движении вверх с первого этажа (цикл Б) — моделирование номера этажа назначения S_i (5-а), вычисление числа пролетов $K_{прi}$=(L–1)+(S–1) — (5-б), числа конечных остановок F_{ki} (5-в) и моделирование по числу промежуточных $F_{п1}$ остановок (5-г), вычисление ЧМВ цикла τ_{mi} по формуле (1) и удельного числа включений n_i по формуле (2) — (шаг 5-д), вычисляется текущая транспортная комфортность по формуле (26) — (шаг 5-е) [5];

6 — при движении вниз на первый этаж с произвольного этажа М (цикл А): моделирование номера случайного этажа вызова M_i (6-а), вычисление числа пролетов $K_{прi}$=(|L_i–M_i|)+(M_i–1) — (6-б), числа конечных остановок F_{ki} — (6-в) и вычисление ЧМВ цикла τ_{mi} по формуле (1) и удельного числа включений n_i по формуле (2) — (6-г);

7 — при движении вниз на первый этаж с произвольного этажа М при стоянии лифта на произвольном этаже L (цикл А+Б) моделирование производится по отельной подпрограмме;

8 — по завершении i-го цикла фиксируются основные кинематические показатели τ_{mi}, n_i и конечный этаж стояния лифта L_{i+1};

9 — моделируется случайное значение паузы между циклами Δ_i по формуле (23);

10 — формируются сумматоры кинематических показателей τ, τ_m, n, $\tau_{ТКБ}$ и показателя транспортной комфортности $\tau_{ТКБ}$ (шаг 10-а), и производится расчет средних значений за i циклов (10-б);

11 — проверяется условие i<I; при его выполнении вводится номер очередного цикла i+1, и моделирование продолжается с шага 4.

Результаты моделирования будут представлены в следующих номерах журнала.

Выводы. Рассмотрены актуальные вопросы установления основных показателей загруженности и транспортной комфортности лифтов жилых домов. Эти показатели определяют безопасность и удобство использования лифтовых установок. Несмотря на наличие ряда государственных стандартов, регламентирующих основные параметры пассажирских лифтов, в этих документах не отражены вопросы

формирования кинематических показателей и транспортной комфортности лифтовых установок как случайного процесса. В ходе исследования получены следующие результаты, сделаны выводы:

1. Выполнена постановка общей задачи поциклового функционирования лифта с выделением влияющих факторов как случайных величин.
2. Разработаны адекватные математические модели формирования показателей загрузки привода лифта, позволяющие определять текущие и средние значения коэффициента машинного времени и удельного числа включений.
3. Впервые обоснованы формулы для расчета количества пролетов, проходимых лифтом в смешанных режимах. Установлены универсальные зависимости пройденного пути от этажности здания.
4. Исследована взаимосвязь пассажиропотока, плотности заселения жилого дома и продолжительности цикла, на основе которой получено соотношение для среднего значения продолжительности цикла, обеспечивающего заданную пропускную способность лифта.
5. Обоснована математическая модель длительности ожидания очередного цикла, что позволяет проводить поцикловое имитационное моделирование процесса.
6. Получена формула для расчета максимальной пропускной способности лифта, которая учитывает продолжительность работы в чистом машинном времени и среднюю степень заполнения кабины лифта.
7. Разработана математическая модель для расчета основного показателя — транспортной комфортности лифтовой установки. Определены важнейшие влияющие факторы.
8. Разработана структура алгоритма имитационного моделирования режимов работы лифтов в целях установления загруженности и транспортной комфортности.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 52941–2008 (ИСО 4190–6:1984). Лифты пассажирские. Проектирование систем вертикального транспорта в жилых зданиях / Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : [сайт]. — URL : http://docs.cntd.ru/document/1200065228 (дата обращения :14.01.2021).

2. ТР ТС 011/2011. Технический регламент Таможенного союза «Безопасность лифтов» (с изменениями на 19 декабря 2019 года) / Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : [сайт]. — URL : http://docs.cntd.ru/document/902307835 (дата обращения : 14.01.2021).

3. Khazanovich, G. S., Otrokov, A. V., Aprishrin, D. S. Computer Modeling of Dynamic Processes of Passenger Elevators at Casual External Influence (Компьютерное моделирование динамических процессов пассажирских лифтов при случайных внешних воздействиях) / 2018. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2018, pp. 1–6. / DOI : https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602877

4. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — 13-е изд., исправленное. — Москва : Наука, 1986. — 544 с.

5. Апрышкин, Д. С. Методика и алгоритм имитационного моделирования режимов работы пассажирского лифта / Д. С. Апрышкин, Г. Ш. Хазанович // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал. — 2020. — № 3 (33). — С. 84–92. DOI : https://doi.org/10.35108/isvp20203(33)84-92

6. Гнеденко, Б. В. Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. — 2-е изд. — Москва : Наука, 1987. — 336 с.

7. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. — 5-е изд. стер. — Москва : Высш. шк., 1998. — 576 с.

8. Об утверждении Регламента технического обслуживания пассажирских лифтов : распоряжение департамент жилищно-коммунального хозяйства и благоустройства города Москвы от 10 февраля 2014 года / Библиотека нормативной документации : [сайт]. — URL : https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293768/4293768395 (дата обращения : 02.02.2021).

9. Правила устройства и безопасной эксплуатации лифтов. ПБ 10-558–2003. — Москва : НТЦ «Промышленная безопасность», 2009. — 177 с.

10. Об организации безопасного использования и содержания лифтов, подъемных платформ для инвалидов, пассажирских конвейеров (движущихся пешеходных дорожек), эскалаторов, за исключением эскалаторов в метрополитенах : пост. Правительства РФ от 24 июня 2017 г. № 743 / Гарант : [сайт]. — URL : https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71607662/ (дата обращения :14.01.2021).

Сдана в редакцию 19.01.2021
Запланирована в номер 03.02.2021

Об авторах:

Апрышкин Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6829-3861, aprechnik@mail.ru

Хазанович Григорий Шнеерович, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3009-4952, hazanovich@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Д. С. Апрышкин — формирование цели и программы исследования, вывод математических моделей, разработка алгоритма имитационного моделирования; Г. Ш. Хазанович — обоснование основных режимов работы лифтовых установок, обоснование влияющих факторов, консультации при выводе математических моделей, разработке алгоритма.

Submitted 19.01.2021
Scheduled in the issue 03.02.2021

Authors:

Apryshkin, Dmitriy S., Senior lecturer, Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6829-3861, aprechnik@mail.ru

Khazanovich, Grigoriy Sh., Professor, Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Dr. Sci., Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3009-4952, hazanovich@mail.ru

Contribution of the authors:

D. S. Apryshkin — formulation of the purpose and program of the research; derivation of mathematical models, development of simulation algorithm; G. S. Khazanovich — study of the basic modes of operation of elevator units, the influencing factors rationale, consultation in the derivation of mathematical models, algorithm development.